干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

乌鲁木齐市城区和郊区近地层比湿分布和廓线特征

李振杰[1,2,3]， 金莉莉[4,5]， 何 清[4,5]， 缪启龙[5]，
买买提艾力·买买提依明[4]

（1 云南省临沧市气象局，云南 临沧 677099； 2 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011；
3 中国科学院大学，北京 100049； 4 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所/中国气象局塔克拉玛干沙漠气象野外科学试验基地，新疆 乌鲁木齐 830002； 5 南京信息工程大学应用气象学院，江苏 南京 210044）

摘 要： 利用乌鲁木齐市城区和郊区的5座100 m气象铁塔10层比湿数据和乌鲁木齐气象站L波段探空雷达资料，详细分析了边界层2 km内比湿廓线特征，城区和郊区近地层比湿季节变化和日变化特征，揭示了乌鲁木齐逆湿的原因，得出以下结果：(1) 乌鲁木齐市比湿季节差异明显，冬季最小，春季、秋季稍大，夏季最大，夏季比湿约为冬季的4～5倍，但秋季仅比春季大1 $g \cdot kg^{-1}$。除冬季外，比湿均随高度增加而趋于减小，夏季减小最显著，冬季比湿的垂直变化很小。比湿廓线极小值白天和夜间出现高度相近，且有多个极小值。夏季和冬季比湿日变化最大，且位相相反；夏季夜间大、白天小，冬季与之相反。冬季，郊区比湿小于城区；其余季节城、郊比湿差异不明显。(2) 2 km内存在逆湿现象，逆湿出现概率高于35%，概率1月最大、7月最小。1月逆湿最大高度超过1 500 m，7月逆湿最大高度可达到1 900 m，且最大厚度可达到1 550 m。逆湿强度最大在7月和10月可达2.5 $g \cdot kg^{-1} \cdot (100\ m)^{-1}$，而1月最小。(3) 1月逆湿往往与逆温相伴随，逆温层改变了水汽的垂直分布结构，从脱地逆温层顶起出现逆湿现象，逆湿还与水汽输送有关。本研究可以有效地揭示空气湿度的季节特征，为研究城市大气污染形成的气象因素提供了一个思路。

关 键 词： 边界层；比湿；廓线；乌鲁木齐

文章编号： 1000-6060(2020)04-0977-20(0977～0996)

比湿的研究被广泛应用于可降水量、水汽输送、水汽收支和水分平衡等水文循环各种大气过程中[1-3]。20世纪70年代以来，全球对流层中上层比湿明显上升[4]，DAI等[5]的研究也表明全球对流层大气水汽呈增加趋势。北半球热带之外的地区对流层中低层比湿也在上升[6]；中国区域对流层低层比湿在上升、但对流层中高层比湿呈下降[7]，而ZHAO等[8]的研究表明1970—2008年以来中国对流层比湿受80年代中期温度上升的影响总体也呈上升趋势；郭艳君等[3]研究表明1958—2005年中国比湿呈南高北低的纬向分布，90%以上的水汽集中在对流层中低层。中国黑河流域中下游对流层大气比湿主要集中在对流层中低层，极大值出现在夏季[9]。对于城市而言，城市效应对湿度影响显著且复杂，北京城区夏季为干岛、冬季为弱湿岛，城区与郊区比湿日变化差异明显[10]；芝加哥市区冬季湿度高于乡村，其他季节市区湿度低于乡村[11]。

乌鲁木齐位于干旱气候区，且为三面环山的地形，夏季水汽总量平均21.66 mm，夏季降水主要发生在夜间，尤其在后半夜，基本与水汽总量的日变化一致[12]，因此对大气边界层比湿进行研究具有重要意义。本文利用位于乌鲁木齐市南部郊区至北

收稿日期： 2019-07-05； **修订日期：** 2020-03-15
基金项目： 中国沙漠气象科学研究基金(Sqj2016006，Sqj2015009)；中央级公益性科研院所基本科研业务费(IDM2020001)；新疆维吾尔自治区高层次人才引进(2016-金莉莉)资助
作者简介： 李振杰(1982-)，男，河南濮阳人，在读博士研究生，工程师，主要从事天气预报、系统开发工作和气候变化水文水资源研究. E-mail：lizhenjie17@163.com
通讯作者： 金莉莉(1984-)，女，云南大理人，博士，副研究员，主要从事大气边界层和陆面过程研究. E-mail：jinlili1984@126.com

部城郊地区的5座100 m(10层)气象铁塔及专业仪器,在2013年6月~2014年4月探测的空气温度、相对湿度和地表大气压强资料,研究乌鲁木齐市城市中心区域和南北郊区近地表层空气比湿的空间差异、比湿在垂直方向上的分布特征;利用乌鲁木齐市常规探空资料研究边界层2 km内比湿随高度分布结构特征,以期对乌鲁木齐近地层湿度结构进行深入研究。

1 资料和湿度计算方法

1.1 100 m 铁塔资料

乌鲁木齐市地势从南郊到北郊其海拔高度逐渐降低,而建成的5座100 m气象铁塔所在地点同样依次降低(图1),分别为:燕南立交(南郊,87°34′ E,43°42′ N,1 009 m .a.s.l)、水塔山(市区,87°38′ E,43°49′ N,890 m .a.s.l)和鲤鱼山(市区,87°34′ E,43° 50′ N,821 m .a.s.l)、红光山(近北郊,87°38′ E,43° 54′ N,717 m .a.s.l)、米东(北郊,87°41′ E,44°01′ N,568 m .a.s.l)。

每座气象铁塔规格一致,都分为上下10层,各层均安装有VAISALA公司HMP45D型温湿度传感器(气温探测范围:-40~60 ℃,精度:±0.3 ℃,分辨率:0.1 ℃;湿度探测范围:0.8%~100%,精度:1%,分辨率1%),在8 m高度安装有VAISALA公司PTB220型气压传感器(气压探测范围:500~1 100 hPa,精度:0.1 hPa,分辨率:0.1 hPa),仪器均在安装架设前进行了标定。本文在使用前,对所有铁塔气温、湿度和气压资料都进行了严格的质量控制和处理[13],数据间隔为每10 min一组。

1.2 L波段雷达探空资料

本文选用2013年4月、7月、10月和2014年1月乌鲁木齐市国家气象站05:00时(乌鲁木齐地方时,下同)和17:00时L波段雷达探空资料,以上述典型月份代表春夏秋冬四季,分析乌鲁木齐市边界层2 km内比湿廓线季节分布特征。

1.3 湿度计算

5座铁塔直接探测到的为相对湿度,为便于分析,需要转换为统一的比湿数据,计算公式为(1)~(2):

$$q = 0.622\frac{f \times E_w \times 1\,000}{P \times 100} = 6.22\frac{f \times E_w}{P} \qquad (1)$$

式中:f 为相对湿度(取整数,非百分数);P 为与气温 T 同步的各时刻近地表大气压强(hPa);q 为空气比湿(g·kg^{-1})。

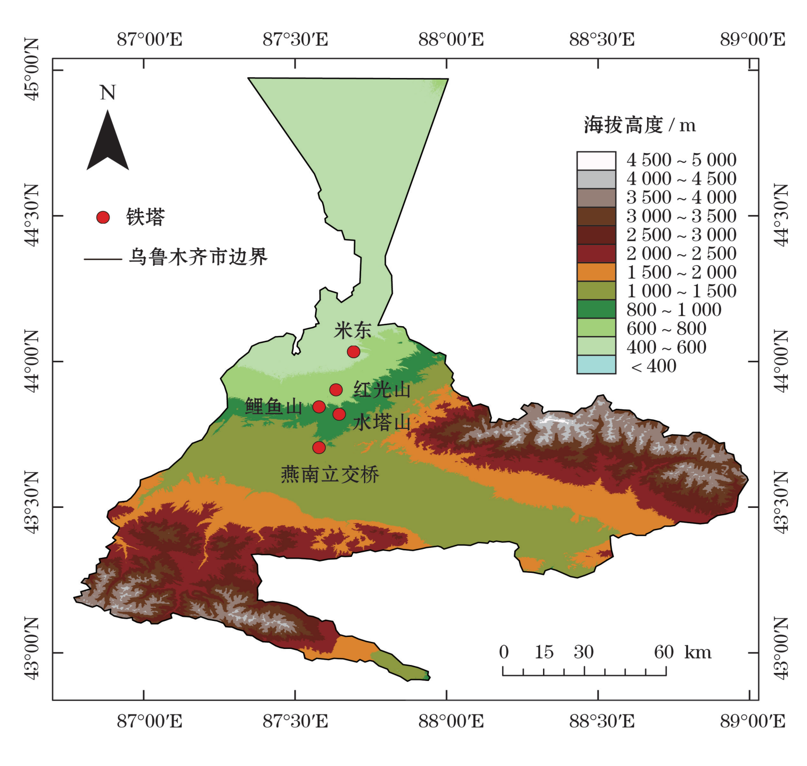


图1 乌鲁木齐市5座100 m铁塔地理位置示意图

Fig. 1 Location of five 100 m height meteorology towers sites in the Urumqi City

$$\lg E_w = 10.795\,74\left(1-\frac{T_1}{T}\right) - 5.028\,001\mathrm{g}\left(\frac{T}{T_1}\right) + 1.504\,75\times10^{-4}\left[1-10^{-8.296\,9\left(\frac{T}{T_1}-1\right)}\right] + 0.428\,73\times10^{-3}\left[10^{4.769\,55\left(1-\frac{T_1}{T}\right)}-1\right] + 0.786\,14 \quad (2)$$

式中：E_w 为纯水平液面饱和水汽压（hPa）；T_1 = 273.16 K（水的三相点温度）；T 为绝对温度（K），T =273.15 + t ℃。

2 结果与分析

2.1 边界层2 km内比湿垂直廓线

图2为乌鲁木齐市典型月份4月、7月、10月、1月的05:00时和17:00时平均大气边界层2 km内比湿垂直分布，是由乌鲁木齐市气象站L波段雷达探空资料计算得到。由图2可知，边界层2 km内空气比湿在4月、7月、10月、1月分别约为2～5 g·kg^{-1}、5～9 g·kg^{-1}、2～5 g·kg^{-1}、1～2 g·kg^{-1}，即空气湿度夏季最大、冬季最小且随高度变化也最小，而春季和秋季相近，这与L波段雷达探测的2 km内风速垂直结构的季节变化一致。

如图2所示，乌鲁木齐市大气边界层比湿在2 km内是随高度递减的，这与青藏高原地区[14]、美国中部平原地区[15]、黑河地区[16]和热带海洋区域[17]的对流边界层比湿的垂直分布特征一致，在中国青藏高原、黑河地区近绿洲沙漠和南疆沙漠都观测到了不同程度的逆湿现象[14,16,18]。乌鲁木齐市边界层也存在明显的逆湿，这可以从乌鲁木齐市气象站L波段雷达探空资料典型月份每日05:00时和17:00时大气边界层2 km内比湿廓线中分析得到，其具体统计结果见表1。

表1为乌鲁木齐市气象站L波段雷达探空资料统计的4月、7月、10月、1月05:00时和17:00时逆湿现象出现的概率。逆湿1月出现概率最大，4月和10月次之，7月概率最小，但整体上概率都在35%以上，且1月每天5:00都呈现逆湿；从逆湿分布高度来看，逆湿最大分布高度可达1 500 m以上，但最高出现在7月17:00（并不在1月），可达到1 900 m；从最大厚度出现时间来看，也是7月17:00，可达到1 550 m；综合5:00和17:00两个时次看，夏季逆湿最大，达5.5 g·kg^{-1}·（100 m）$^{-1}$以上，秋季的逆湿也较大，可达到2.5 g·kg^{-1}·（100 m）$^{-1}$以上，4月和1月逆湿是最小的。

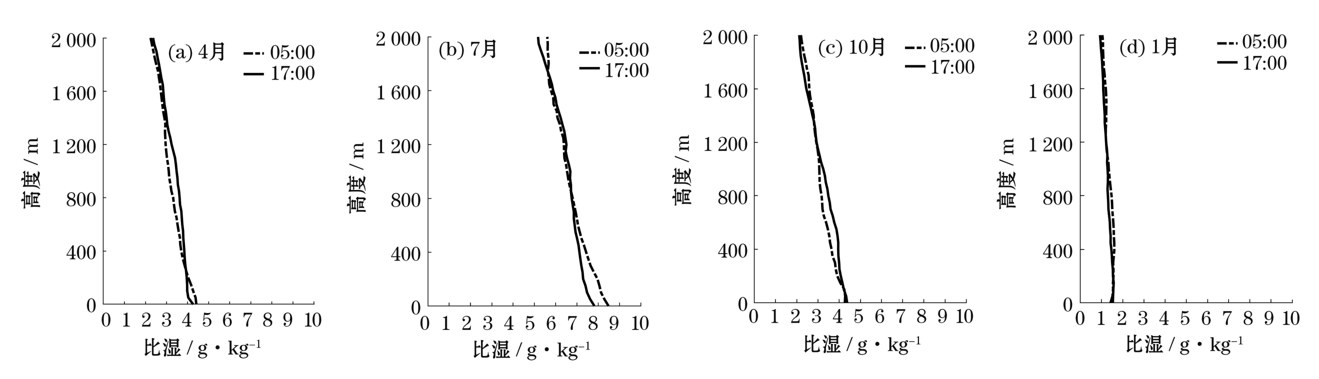


图2 2013年4月、7月、10月，2014年1月乌鲁木齐市大气边界层2 km内平均比湿廓线

Fig. 2 Profile of mean specific humidity in the 2 km boundary layer in April, July, October 2013 and January 2014 in Urumqi City

表1 2013年4月、7月、10月、2014年1月乌鲁木齐市逆湿出现频率

Tab. 1 Frequency of specific humidity inversion in April, July, October 2013 and January 2014 in Urumqi City

时间	4月		7月		10月		1月	
	5:00	17:00	5:00	17:00	5:00	17:00	5:00	17:00
出现频率 / %	90	53	41	35	51	57	100	90
最大高度 / m	1 800	1 650	1 800	1 900	1 600	1 850	1 650	1 500
最大厚度 / m	650	750	450	1 550	1 150	750	650	750
最大值 / g·kg^{-1}·（100 m）$^{-1}$	1.87	1.47	5.8	2.57	2.67	1.14	1.54	1.41

注：出现频率逆湿出现时刻的记录与所有记录数之比

形成逆湿现象的原因往往较为复杂,其影响因素较多、形成机制也比较复杂,学界普遍认为其原因主要有大气平流输送[14,19]、天气变化和下垫面背景[20]、逆温层[21]。

大气边界层存在逆温层时,大气层结状态一般非常稳定,这种稳定结构可使大量水汽在逆温层内滞留,从而在逆温层顶堆积形成逆湿。在1月的时候,乌鲁木齐市往往是逆湿与逆温相伴生,并维持较长时间(图3)。本文选取两个典型天气日进行分析,其中2014年1月1日为晴天、2014年1月6日为降雪天。由图3可以看出,逆温层的存在改变了边界层内水汽分布的垂直结构,不仅温度随高度的增加是不连续,而且在逆温层之上,大气水汽是急剧减少的,即这种逆温层呈多层逆温分布的结构。逆温层的存在,促使水汽在逆温层顶部堆积下来,这里的比湿最大,如2014年1月1日17:00的脱地逆温层顶高度为950 m,1 100 m高度处的比湿最大,为1.95 g·kg^{-1}。同样,近地层也出现了脱地逆温,与之对应出现比湿随高度增加的逆湿现象。在脱地逆温层的顶部也开始出现逆湿现象,如2014年1月1日5:00脱地逆温层顶位置为1 150 m,该高度处比湿为0.72 g·kg^{-1},之后在1 450 m增加到1.56 g·kg^{-1}。逆湿与逆温的对应关系同样较好的体现在降雪天,此时逆湿出现高度和分布高度范围与逆温的高度和分布高度范围均一致,如2014年1月6日5:00明显的脱地逆温出现在1 050~1 200 m,且该高度范围内的逆湿现象最为明显,从0.87 g·kg^{-1}增加到0.99 g·kg^{-1}。

从图4c可知,混合层内600~1 050 m内风速在2013年7月4日5:00相对较大(3~4 m·s^{-1}),在700~850 m高度范围出现逆湿,同时风向由偏S风转为偏N风,逆湿与边界层湿空气的平流输送有

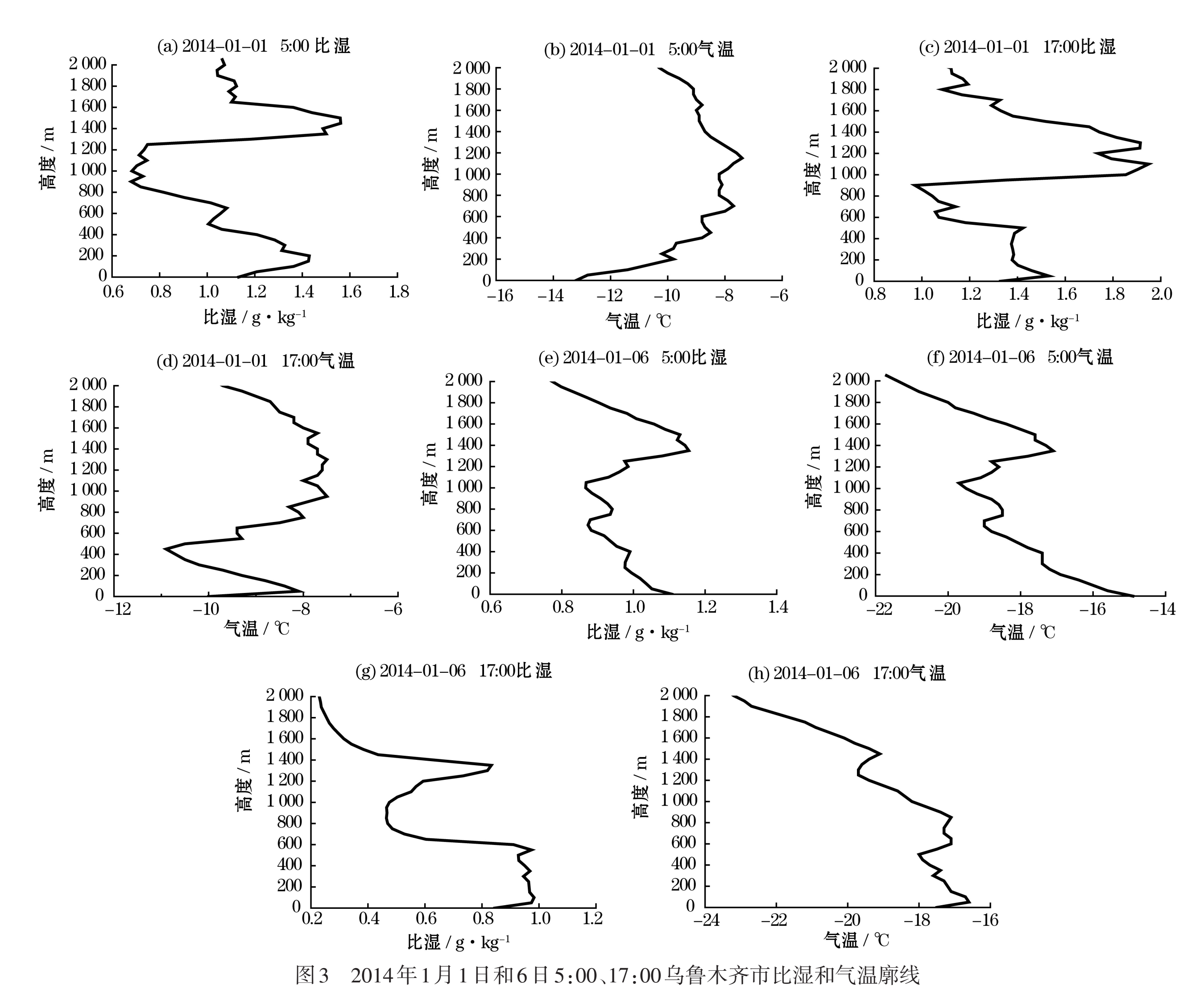


图3 2014年1月1日和6日5:00、17:00乌鲁木齐市比湿和气温廓线

Fig. 3 Profile of specific humidity and air temperature on 5:00 and 17:00 January 1 and 6, 2014 in Urumqi City

关。因此乌鲁木齐市大气边界层逆湿的存在与水汽输送有着密切的关系。

2.2　湿度年内变化特征

2013年6月~2014年4月乌鲁木齐市各气象塔的逐月平均比湿变化如图5所示。5个塔的比湿均有明显的季节变化特征,但每个塔同月份比湿数值很相近,垂直变化不显著。红光山、鲤鱼山、水塔山(10~28 m)、米东、燕南立交11个月10~100 m平均比湿分别为3.87~4.1、3.8~4.11、3.93~4.01、3.82~4.06 g·kg⁻¹和3.75~4.05 g·kg⁻¹;最低比湿和最高比湿分别在1/2月和7/8月;5座气象塔最低比湿分别为 1.15~1.18、1.17~1.23、1.15~1.2、1.05~1.1 和

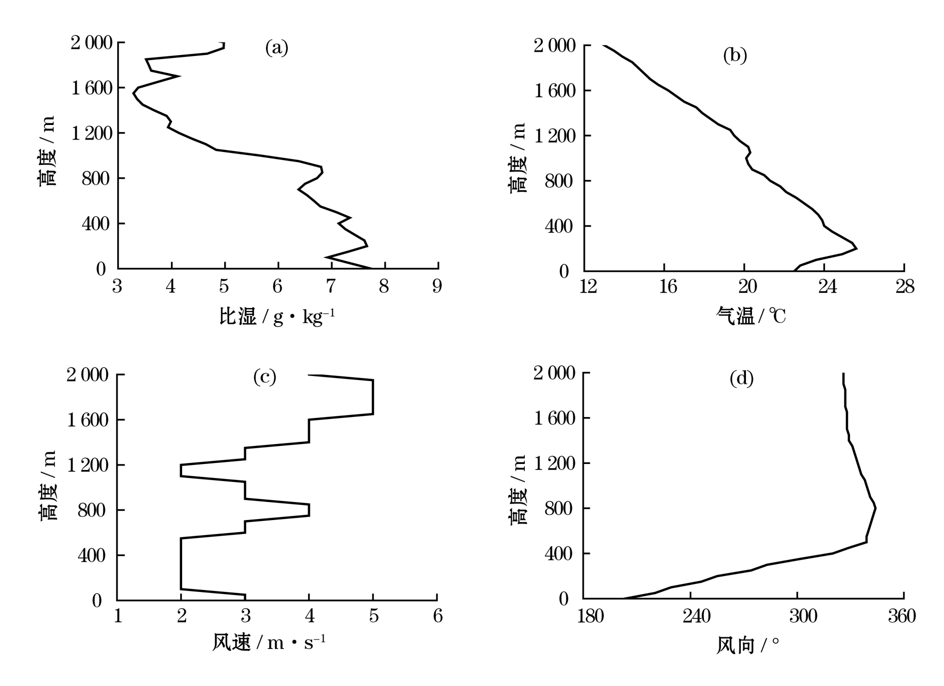


图4　2013年7月4日5:00乌鲁木齐市比湿、气温、风速和风向廓线

Fig. 4　Profile of specific humidity, air temperature, wind speed and wind direction on 5:00 July 4, 2013 in Urumqi

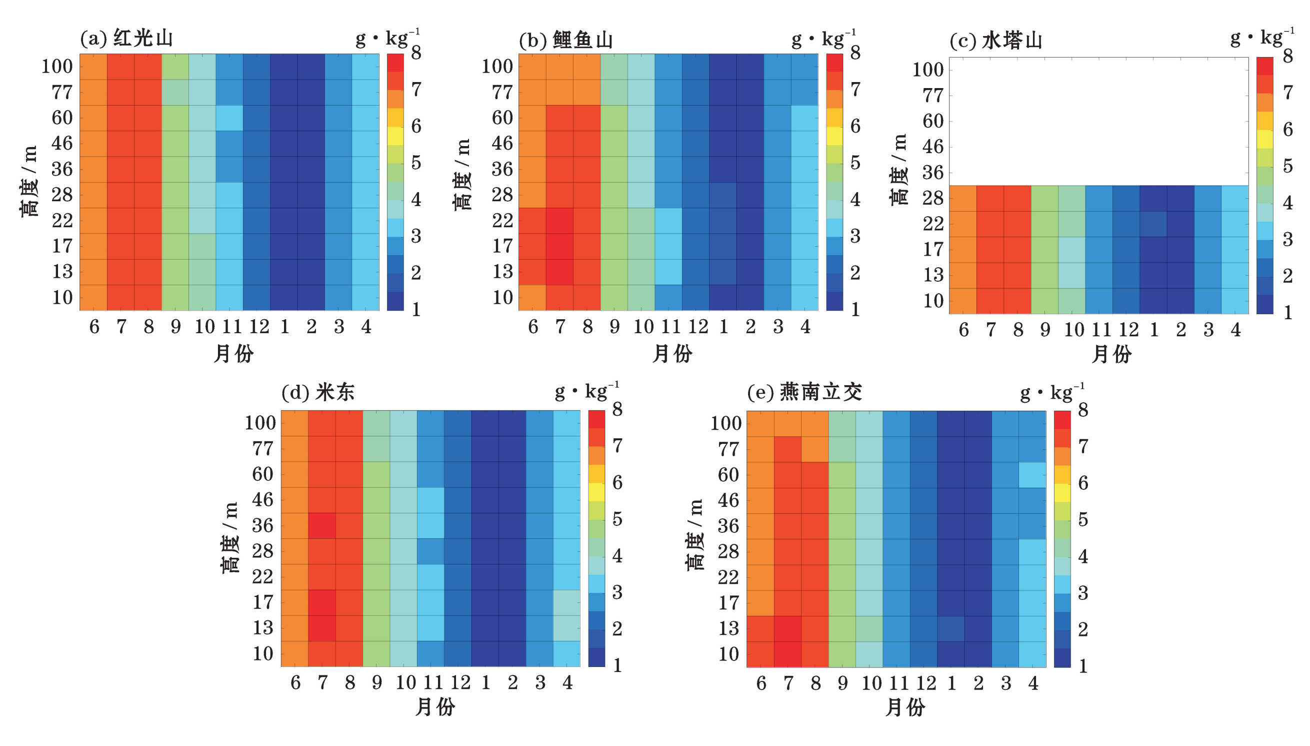


图5　乌鲁木齐市5座100 m气象塔逐月平均比湿

Fig. 5　Monthly mean specific humidity of five 100 m height meteorological towers in Urumqi City

1.12～1.17 g·kg^{-1}，最高比湿分别为7.11～7.49、6.94～7.55、7.19～7.36、7.18～7.67g·kg^{-1}和6.99～7.59 g·kg^{-1}。

2.3 年平均比湿日变化特征

图6给出了乌鲁木齐市5座气象塔比湿年平均日变化特征。从图6可以看出，5座气象塔比湿年平均日变化特征明显，夜间大、白天小，与气温日变化相反。红光山、鲤鱼山、水塔山、米东和燕南立交日最大比湿分别在2:00～3:00(4.01～4.34 g·kg^{-1})、1:00～3:00(3.95～4.32 g·kg^{-1})、2:00(4.16～4.25 g·kg^{-1})、0:00和11:00(4.06～4.35 g·kg^{-1})、1:00(3.91～4.31 g·kg^{-1})，比最高气温出现时间滞后1～2 h(燕南立交滞后2～4 h)；日最小比湿分别在18:00(3.7～3.83 g·kg^{-1})、18:00～19:00(3.7～4 g·kg^{-1})、18:00～19:00(3.77～3.86 g·kg^{-1})、17:00～18:00(3.62～3.75 g·kg^{-1})、13:00～15:00(3.68～3.91 g·kg^{-1})。

白天，日出后，随着地面温度上升，近地层下层比湿急剧减小。如，红光山10 m高度9:00的比湿由4.33 g·kg^{-1}下降到10:00的4.29 g·kg^{-1}再到11:00的4.19 g·kg^{-1}，2 h内下降了0.14 g·kg^{-1}；鲤鱼山22 m高度10:00的比湿由4.2 g·kg^{-1}下降到11:00的4.16 g·kg^{-1}再到12:00的4.09 g·kg^{-1}，2 h内下降了0.11 g·kg^{-1}；水塔山10 m高度9:00的比湿由4.16 g·kg^{-1}下降到10:00的4.12 g·kg^{-1}再到11:00的4.03 g·kg^{-1}，2 h内下降了0.13 g·kg^{-1}；米东10 m高度10:00的比湿由4.25 g·kg^{-1}下降到11:00的4.18 g·kg^{-1}再到12:00的4.04 g·kg^{-1}，2 h内下降了0.21 g·kg^{-1}，是下降幅度最大的一个站，可能与地形平坦、开阔有关；燕南立交13 m高度9:00的比湿由4.21 g·kg^{-1}下降到10:00的4.18 g·kg^{-1}再到11:00的4.08 g·kg^{-1}，2 h内下降了0.13 g·kg^{-1}。

同时，红光山0:00～10:00之间46 m内的比湿随高度增加而急剧减小，0:00～10:00，10 m高度比湿为4.28～4.34 g·kg^{-1}，到了46 m高度，减小到了4～4.07 g·kg^{-1}，到了60 m比湿反而上升到了4.12～4.19 g·kg^{-1}。可见0:00～10:00之间比湿在46～60 m高度存在逆湿现象。11:00～17:00和22:00～23:00之间22 m内比湿也随高度增加而减小，到了28 m比湿反而上升，然后出现波动式下降和上升，即11:00～17:00和22:00～23:00之间比湿在22 m以上存在多层逆湿现象。18:00～21:00之间17 m内比湿也随高度增加而减小，到了22 m比湿反而上升，然后出现波动式下降和上升，即18:00～21:00之间比湿在17 m以上存在多层逆湿现象。

此外，鲤鱼山全天36～46 m均存在逆湿现象，0:00～10:00之间10～17 m和11:00～23:00之间10～22 m也存在逆湿现象。水塔山0:00～11:00和22:00～23:00之间17～22 m存在逆湿，12:00～19:00之间17～28 m也存在逆湿。米东全天10～13 m和28～36 m存在逆湿。燕南立交全天存在多层逆湿现象，分布在10～13 m、22～28 m、46～60 m，36～46 m高度11:00～22:00之间和77～100 m高度10:00～13:00之间也存在逆湿。可见：乌鲁木齐近地层100 m内存在逆湿现象，但出现的高度和时间不同。

达到最低值后，比湿开始回升(燕南立交波动回升)，到0:00～3:00比湿值增加到了一天内的最大值，比最低气温出现的时间提前了5.5～7.5 h，这与塔克拉玛干沙漠腹地最大比湿出现时间比最低气温出现时间提前1个多小时不同[18]，而次峰值大约在8:00～10:00。

2.4 各季比湿日变化特征

如图7给出了乌鲁木齐市5座气象塔2013年夏季、秋季、冬季、2014年春季近地层湿度梯度日变化曲线和高度－时间剖面图。红光山夏季近地层日平均比湿在6.96～7.33 g·kg^{-1}之间；比湿日变化特征明显，夜间大、白天小。18:00最小，约6.25～6.48 g·kg^{-1}，到8:30～10:00(36 m和46 m在3:00)达到最大，约7.35～8.04 g·kg^{-1}。秋季近地层日平均比湿在3.74～4.03 g·kg^{-1}之间，比夏季小约2.5 g·kg^{-1}；日变化特征没有夏季明显，但仍为夜间大、白天小。17:50～18:30(100 m高度8:20)左右达到最小值，约3.62～3.76 g·kg^{-1}，之后比湿开始回升，0:30(10 m，13 m，36 m)、10:00～10:50(17 m、22 m、28 m、46 m、60 m、77 m)、13:00(100 m)达到最高值，约3.84～4.23 g·kg^{-1}。冬季近地层日平均比湿在1.57～1.63 g·kg^{-1}之间，比夏季小5.12～5.7 g·kg^{-1}；日变化特征刚好与夏季、秋季相反，即夜间小、白天大。白天，比湿在17:00～17:30达到最大值，约1.63～1.72 g·kg^{-1}，之后比湿逐渐减小，9:10～9:40达到最低值，约1.49～1.53 g·kg^{-1}。春季近地层日平均比湿在2.81～3 g·kg^{-1}之间，比秋季小约1 g·kg^{-1}；日变化特征不明显，但2:00～7:00、17:00～

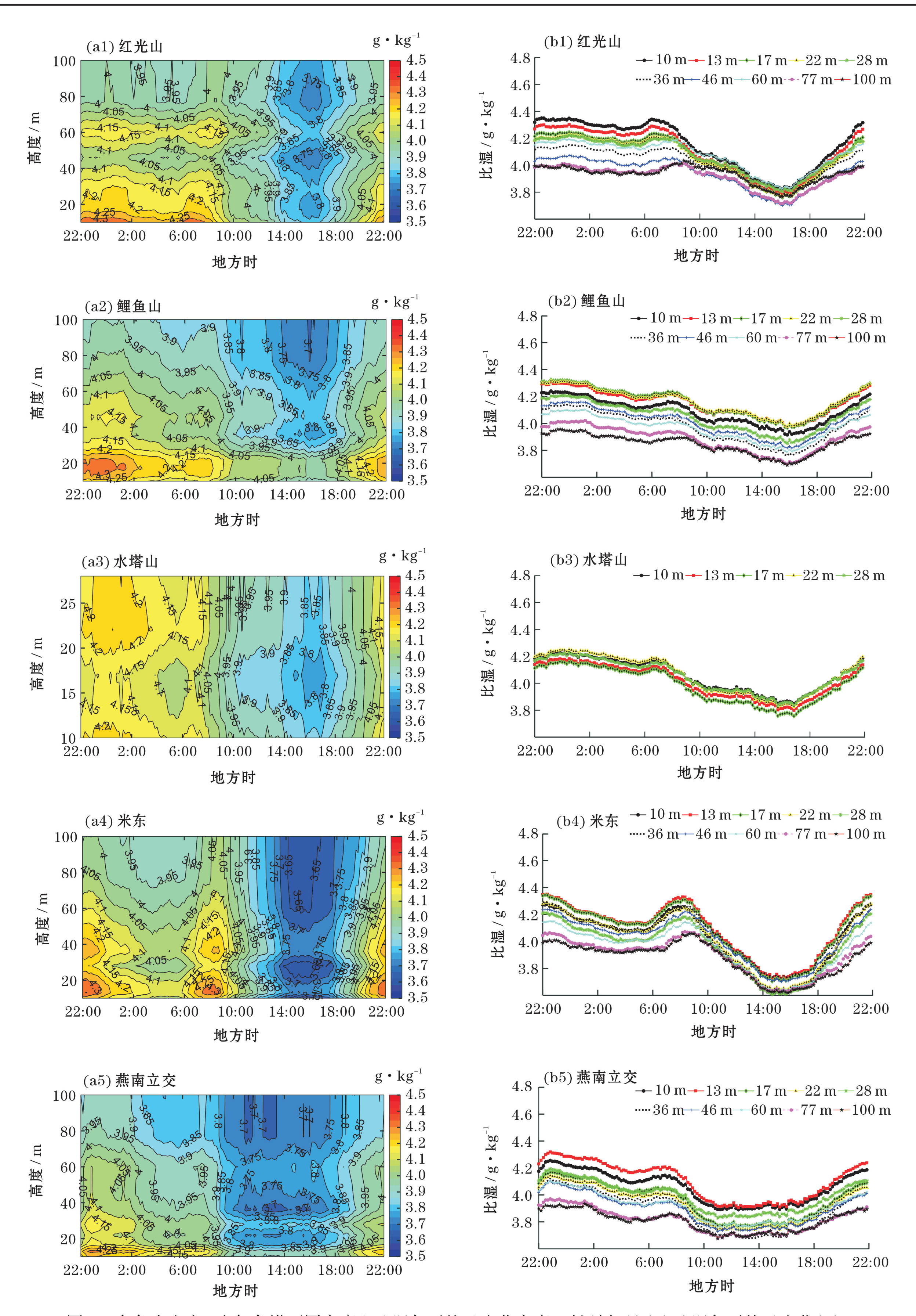
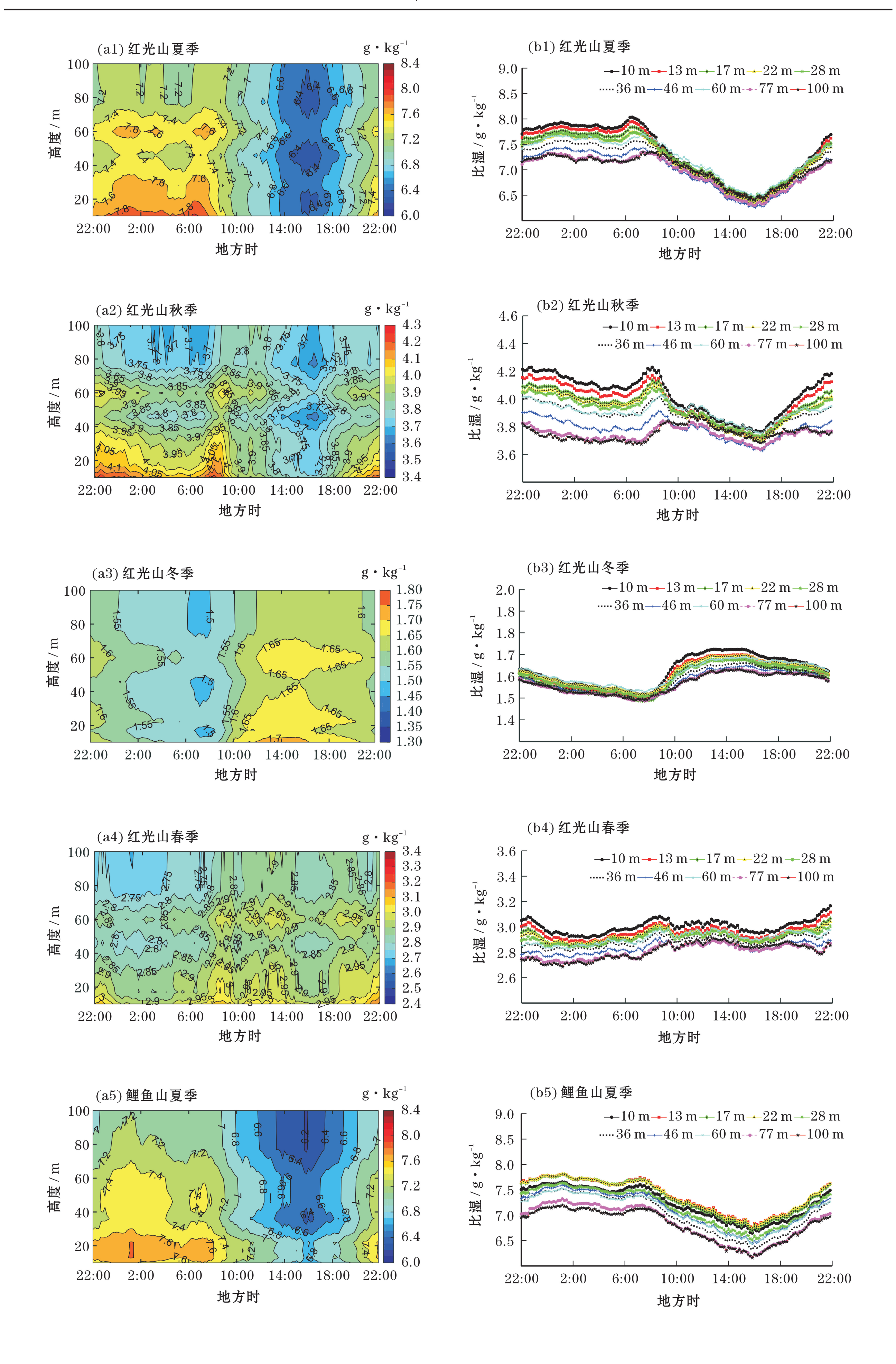
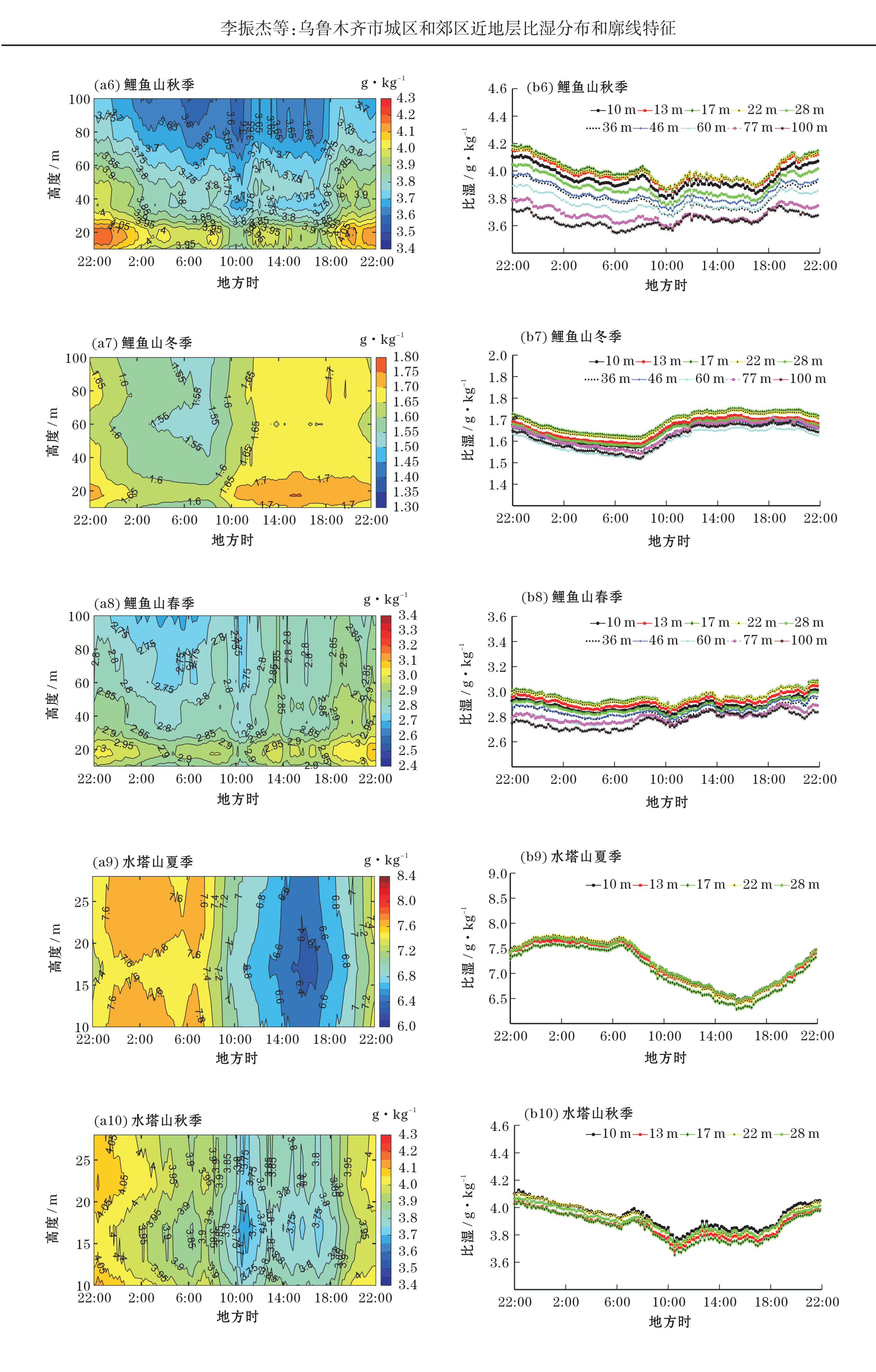


图6　乌鲁木齐市5座气象塔不同高度上比湿年平均日变化高度-时间剖面(a)和比湿年平均日变化(b)

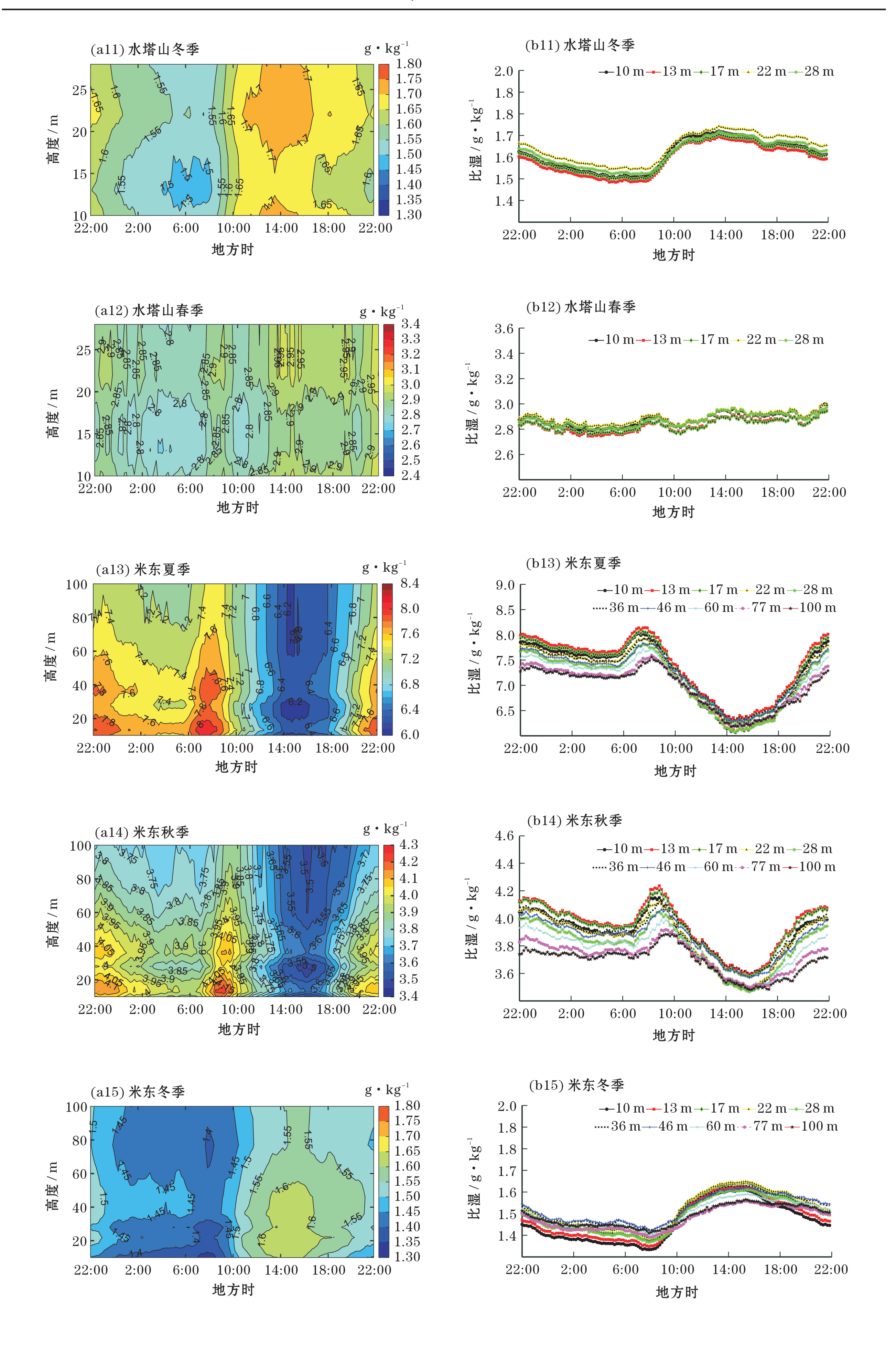
Fig. 6　Mean diurnal variation of specific humidity of five 100 m height meteorology towers in Urumqi City for different height-time profile (left) and the curve of specific humidity (right)



(a1) 红光山夏季
(b1) 红光山夏季
(a2) 红光山秋季
(b2) 红光山秋季
(a3) 红光山冬季
(b3) 红光山冬季
(a4) 红光山春季
(b4) 红光山春季
(a5) 鲤鱼山夏季
(b5) 鲤鱼山夏季
g·kg⁻¹
高度 / m
比湿 / g·kg⁻¹
地方时
22:00
2:00
6:00
10:00
14:00
18:00
10 m
13 m
17 m
22 m
28 m
36 m
46 m
60 m
77 m
100 m



(a6) 鲤鱼山秋季
(b6) 鲤鱼山秋季
(a7) 鲤鱼山冬季
(b7) 鲤鱼山冬季
(a8) 鲤鱼山春季
(b8) 鲤鱼山春季
(a9) 水塔山夏季
(b9) 水塔山夏季
(a10) 水塔山秋季
(b10) 水塔山秋季
高度 / m
比湿 / g·kg⁻¹
g·kg⁻¹
地方时
10 m 13 m 17 m 22 m 28 m
36 m 46 m 60 m 77 m 100 m
22:00 2:00 6:00 10:00 14:00 18:00 22:00


(a11) 水塔山冬季
(b11) 水塔山冬季
(a12) 水塔山春季
(b12) 水塔山春季
(a13) 米东夏季
(b13) 米东夏季
(a14) 米东秋季
(b14) 米东秋季
(a15) 米东冬季
(b15) 米东冬季
高度 / m
比湿 / g · kg⁻¹
g · kg⁻¹
地方时
10 m 13 m 17 m 22 m 28 m
36 m 46 m 60 m 77 m 100 m
22:00 2:00 6:00 10:00 14:00 18:00 22:00

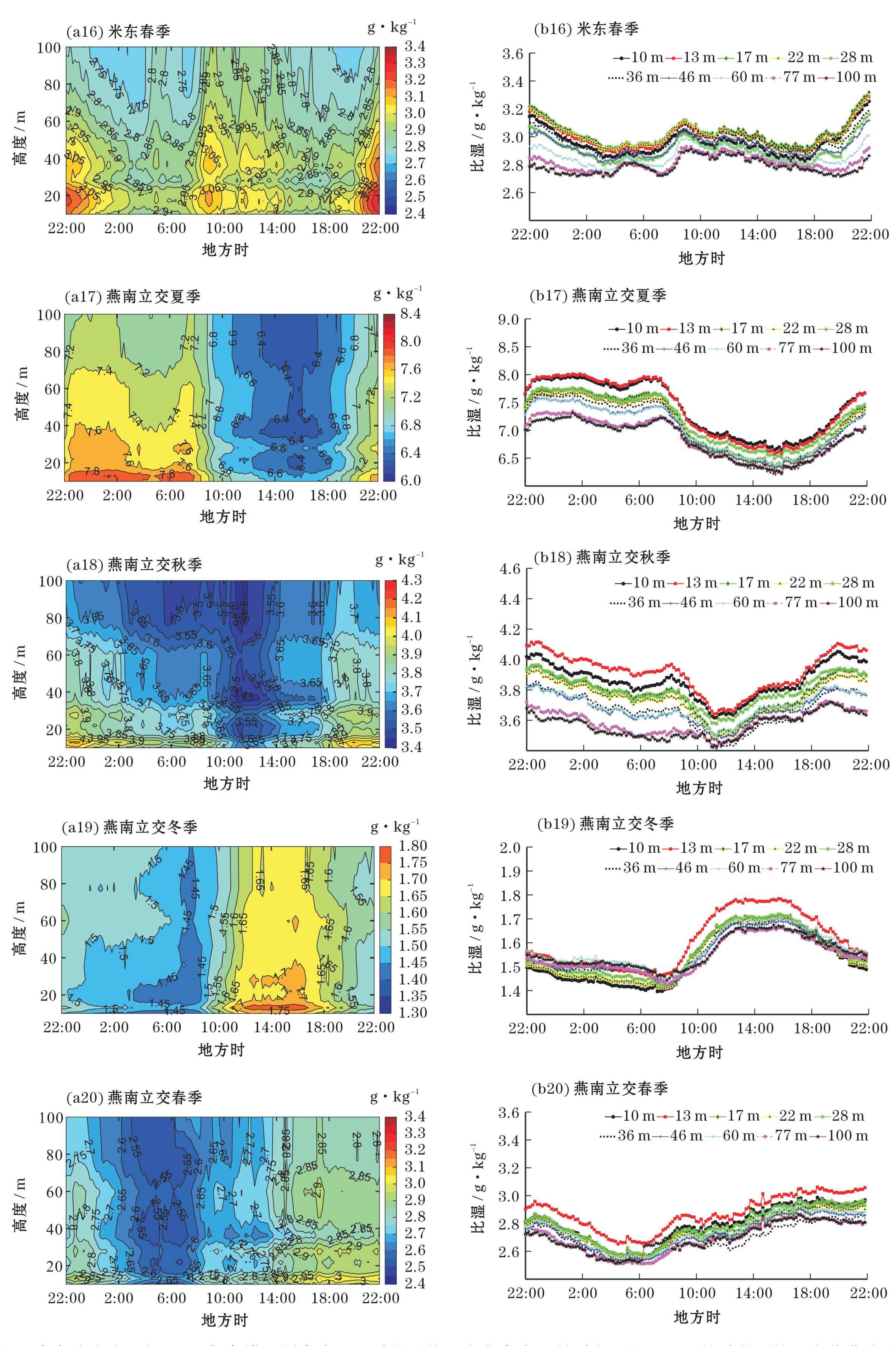


图7 乌鲁木齐市5座100 m气象塔不同高度比湿季节平均日变化高度-时间剖面(a)和比湿的季节平均日变化曲线(b)

Fig. 7 Season average diurnal variation of specific humidity of five 100 m height meteorology towers in Urumqi City for different height-time profile (a) and specific humidity (b)

19:00湿度较小。夏季、秋季46~60 m,冬季17~22 m、46~60 m,春季46~60 m高度内全天均有逆湿现象。

鲤鱼山夏季近地层日平均比湿在6.8~7.39 g·kg⁻¹之间;比湿日变化特征明显,夜间大、白天小。17:50最小,约6.16~6.76 g·kg⁻¹,到3:10~3:20达到最大,约7.2~7.81 g·kg⁻¹。秋季近地层日平均比湿在3.64~4.01 g·kg⁻¹之间,比夏季小约3.16~3.38 g·kg⁻¹;日变化特征不明显,但仍有夜间大、白天小的特点。冬季近地层日平均比湿在1.6~1.69 g·kg⁻¹之间,比夏季小5.2~5.7 g·kg⁻¹;日变化特征刚好与夏季相反,即夜间小、白天大。夜间,比湿在9:30~10:00达到最小值,约1.51~1.62 g·kg⁻¹,之后比湿逐渐增加,14:00~22:00时段变化平缓,17:10~17:50(46 m以下)和20:20(60 m以上)达到最高值,约1.67~1.75 g·kg⁻¹。春季近地层日平均比湿在2.77~2.96 g·kg⁻¹之间,比秋季小约1 g·kg⁻¹;日变化特征不明显。夏季10~13 m、17~22 m(11:00~23:00)、36~46 m,秋季10~17 m、36~46 m,冬季10~17 m、60~77 m,春季10~17 m、36~46 m(12:00~23:00)高度内全天均有逆湿现象。

水塔山夏季近地层日平均比湿在7.05~7.2 g·kg⁻¹之间;比湿日变化特征明显,夜间大、白天小。17:40~18:00最小,约6.29~6.47 g·kg⁻¹,到2:50~3:20达到最大,约7.59~7.77 g·kg⁻¹。秋季近地层日平均比湿在3.86~3.94 g·kg⁻¹之间,比夏季小约3.19~3.26 g·kg⁻¹;日变化特征没有夏季明显,但仍为夜间大、白天小。冬季近地层日平均比湿在1.59~1.64 g·kg⁻¹之间,比夏季小5.46~5.56 g·kg⁻¹;日变化特征刚好与夏季相反,即夜间小、白天大。比湿在7:00~8:40达到最小值,约1.48~1.54 g·kg⁻¹,之后10:00~13:00时段比湿迅速增加,然后变化平缓,15:30达到最高值,约1.69~1.74 g·kg⁻¹。春季近地层日平均比湿在2.83~2.89 g·kg⁻¹之间,比秋季小约1 g·kg⁻¹;日变化特征不明显。夏季17~28 m,秋季17~22 m,冬季13~22 m,春季17~22 m高度内全天均有逆湿现象。

米东夏季近地层日平均比湿在6.94~7.37 g·kg⁻¹之间;比湿日变化特征明显,夜间大、白天小。16:20~16:50最小,约6.07~6.32 g·kg⁻¹,到9:10~10:10达到最大,约7.56~8.14 g·kg⁻¹。秋季近地层日平均比湿在3.69~3.94 g·kg⁻¹之间,比夏季小约3.25~3.43 g·kg⁻¹;日变化特征明显,10:50~11:20最大,约3.88~4.24 g·kg⁻¹,到17:50达到最小,约3.47~3.6 g·kg⁻¹。冬季近地层日平均比湿在1.46~1.52 g·kg⁻¹之间,比夏季小5.48~5.85 g·kg⁻¹;日变化特征刚好与夏季相反,即夜间小、白天大。比湿在9:50达到最小值,约1.33~1.42 g·kg⁻¹,之后近地层下层比湿迅速增大,中、上层比湿逐渐增加,16:10~17:30达到最高值,约1.56~1.65 g·kg⁻¹。春季近地层日平均比湿在2.79~3.3 g·kg⁻¹之间,比秋季小约0.64~0.9 g·kg⁻¹;比湿在0:00和11:00(77 m和100 m)达到最大值,约2.91~3.32 g·kg⁻¹,18:10~19:20(下5层)和4:50~5:10(上5层)达到最小值,约2.71~2.9 g·kg⁻¹。夏季10~13 m,秋季10~13 m、28~36 m,冬季10~22 m、28~36 m、77~100 m,春季10~17 m、28~36 m高度内全天均有逆湿现象。

燕南立交夏季近地层日平均比湿在6.82~7.39 g·kg⁻¹之间;比湿日变化特征明显,夜间大、白天小。17:30~18:00最小,约6.19~6.65 g·kg⁻¹,到3:20和0:50~1:30(28 m、46 m、60 m)达到最大,约7.31~8.01 g·kg⁻¹。秋季近地层日平均比湿在3.56~3.92 g·kg⁻¹之间,比夏季小约3.26~3.47 g·kg⁻¹;日变化特征明显,10:00后比湿迅速下降,到13:00~13:20达到最低值,约3.41~3.64 g·kg⁻¹,然后比湿迅速上升,到0:40~0:50和21:10~21:50(10 m、77 m、100 m)达到最大值,约3.72~4.12 g·kg⁻¹。冬季近地层日平均比湿在1.54~1.61 g·kg⁻¹之间,比夏季小5.28~5.78 g·kg⁻¹;日变化特征刚好与夏季相反,即夜间小、白天大。比湿在9:10~10:00达到最小值,约1.4~1.46 g·kg⁻¹,之后比湿迅速增加,其中13 m增幅最大,15:00~18:00时段变化平缓,15:20(10 m)和17:20~17:50达到最高值,约1.66~1.78 g·kg⁻¹。春季近地层日平均比湿在2.69~2.87 g·kg⁻¹之间,比秋季小约0.87~1.05 g·kg⁻¹;日变化特征明显,6:20~6:40和8:10~8:40(36 m、60 m、77 m)达到最低值,约2.5~2.65 g·kg⁻¹,然后比湿迅速上升,12:00后逐渐上升,到19:10~20:50和23:40~23:50(17 m、36 m),约2.86~3.06 g·kg⁻¹。夏季10~13 m(0:00~10:00)、22~28 m、36~46 m(11:00~22:00)、46~60 m(11:00~23:00),秋季10~13 m、22~28 m、36~60 m(12:00~22:00),冬季10~13 m、46~60 m,春季10~13 m、22~28 m、

36～60 m高度内全天均有逆湿现象。

2.5　比湿廓线季节变化特征

（1）春季

从图8可知，乌鲁木齐市春季铁塔比湿廓线呈多层结构，从趋势上看随高度增加比湿趋于减小，这一特征与城市（如：北京[22]）、典型沙漠[23-24]、青藏高原[23]、亚洲戈壁[25]等不同类型下垫面的观测结果相似。与其他下垫面仅有1～2个极小值相比，乌鲁木齐比湿廓线较为特殊的是具有多个极小值，且其白天和夜间出现的高度大致相同。

南郊燕南立交比湿梯度在11:00～23:00大于其他时次，在10～13 m高度梯度最大[1.7～3.2 g·kg^{-1}·(100 m)$^{-1}$]。城区水塔山各时次比湿梯度相差不大，最大梯度在10～13 m高度范围为-1.7～-1.3 g·kg^{-1}·(100 m)$^{-1}$，但17～22 m有相对较强逆湿，为1.1～1.2 g·kg^{-1}·(100 m)$^{-1}$。鲤鱼山位于城区，其比湿梯度各时次相差较小，在10～13 m范围内梯度最大，约1～1.3 g·kg^{-1}·(100 m)$^{-1}$。位于近北郊的红光山比湿梯度各时次相近，在10～13 m高度比湿梯度最大，比湿梯度值范围为－1.7～－1.4 g·kg^{-1}·(100 m)$^{-1}$。北郊米东比湿梯度各时次同样相差较小，在10～13 m高度出现最大梯度1.2～1.9 g·kg^{-1}·(100 m)$^{-1}$。

总体上看，每座铁塔一天中的最大湿度都是出现在21:00（一般为乌鲁木齐日落前后），一种较为可能的原因是白天地面水分蒸发进入上层大气，之后在傍晚时分空气冷却下沉并将上层水汽反向带到近地面层空气中，从而增大了近地层水汽含量。

（2）夏季

乌鲁木齐市5座铁塔的夏季比湿廓线同样随高度增加而趋于减小，同时这种逆湿层是多层分布的，具体如图9所示。南郊燕南立交各时次的最大梯度分布高度为13～17 m，比湿梯度值范围－7.2～－5.5 g·kg^{-1}·(100 m)$^{-1}$，可以说各时次梯度数值相近。在主城区的水塔山比湿梯度各时次之间相差同样很小，最大梯度分布在17～22 m高度范围[约2.1～3.4 g·kg^{-1}·(100 m)$^{-1}$]。位于城区的鲤鱼山，其比湿梯度在12:00～15:00达到最大，且10～13 m处的梯度最大、逆湿最强[约4.2～5.2 g·kg^{-1}·(100 m)$^{-1}$]。位于近北郊的红光山比湿梯度最大的时段

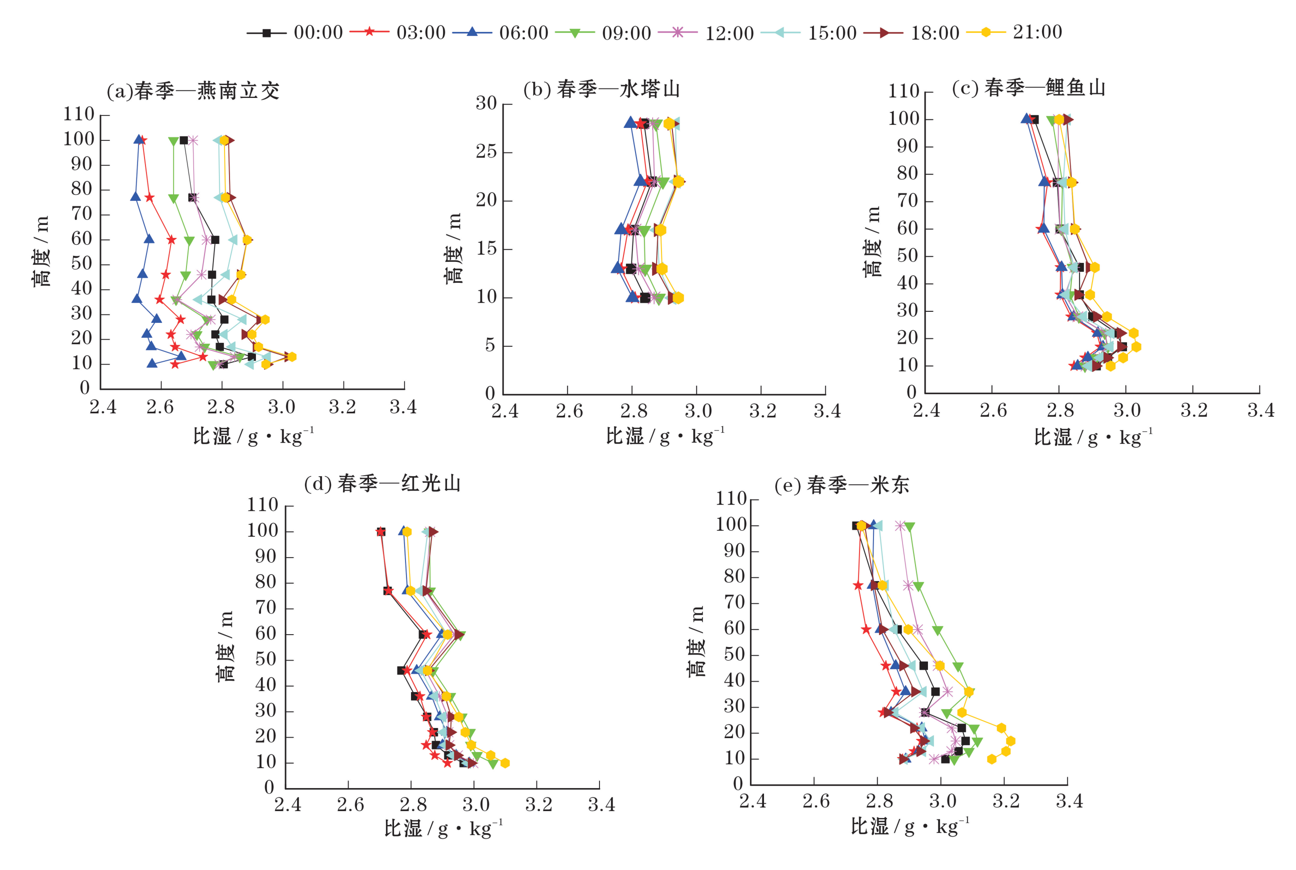


图8　乌鲁木齐市5座梯度塔近地层100 m春季比湿廓线

Fig. 8　Specific humidity profiles of five 100 m height meteorology towers in spring in Urumqi City

为0:00～6:00,且最大值分布在10～13 m高度处[－2.9～－1.2 g·kg⁻¹·(100 m)⁻¹]。位于北郊的米东,其比湿梯度最大值出现在12:00～21:00,在10～13 m具有最大的梯度[3.1～8.1 g·kg⁻¹·(100 m)⁻¹]。

夏季与春季相比有一个特点,即夏季时一天中的最大湿度出现在后半夜时段,一种较为可能的机制是夏季蒸发更强,气层温度较春季高,空气冷却所需时间更长,从而使白天蒸发进入上层大气的水汽一直要到后半夜才能够返回近地面层空气中,这较春季明显滞后。

(3)秋季

秋季比湿同样随高度增加而减小且存在多层逆湿,具体如图10所示。南郊燕南立交、城区水塔山和鲤鱼山各时次比湿梯度相近。其中燕南立交在13～17 m梯度最大[－3.9～－3.4 g·kg⁻¹·(100 m)⁻¹],在10～13 m高度出现最大比湿度梯度[0.8～3.2 g·kg⁻¹·(100 m)⁻¹]。水塔山在10～13 m有最大比湿梯度[－2.3～－2 g·kg⁻¹·(100 m)⁻¹],在17～22 m高度也有存在较强的逆湿[1.1～1.5 g·kg⁻¹·(100 m)⁻¹]。城区鲤鱼山最大比湿梯度出现在22～28 m高度[约－2.1～－1.5 g·kg⁻¹·(100 m)⁻¹],低层10～13 m的逆湿也较强[1.5～1.7 g·kg⁻¹·(100 m)⁻¹]。近北郊红光山和北郊米东与上述三座铁塔稍有不同:红光山的比湿梯度在21:00～6:00最大,且在10～13 m高度处为极大值[－1.3～－1.2 g·kg⁻¹·(100 m)⁻¹];米东比湿梯度在9:00～15:00最大且该时段最大梯度出现高度为10～13 m[1.9～4 g·kg⁻¹·(100 m)⁻¹]。

(4)冬季

五座铁塔在冬季同样存在多层逆湿,但逆湿梯度值很小、逆湿很弱,具体如图11所示。与夏季、秋季相比,冬季比湿在垂直高度上较为稳定、变化很小。较为明显的特征有:从时间上看,燕南立交在21:00～6:00比湿梯度最大,垂直方向上是在10～13 m最大[2.1～2.5 g·kg⁻¹·(100 m)⁻¹];城区水塔山、鲤鱼山和北郊米东各时次比湿梯度相差很小。水塔山在17～22 m出现最大梯度[0.7～0.9 g·kg⁻¹·(100 m)⁻¹];鲤鱼山在13～17 m具有最大梯度[0.8～0.9 g·kg⁻¹·(100 m)⁻¹];近北郊红光山最大比湿梯度时段为9:00～18:00,高度范围10～13 m[－0.9～－0.6 g·kg⁻¹·(100 m)⁻¹];米东在13～17

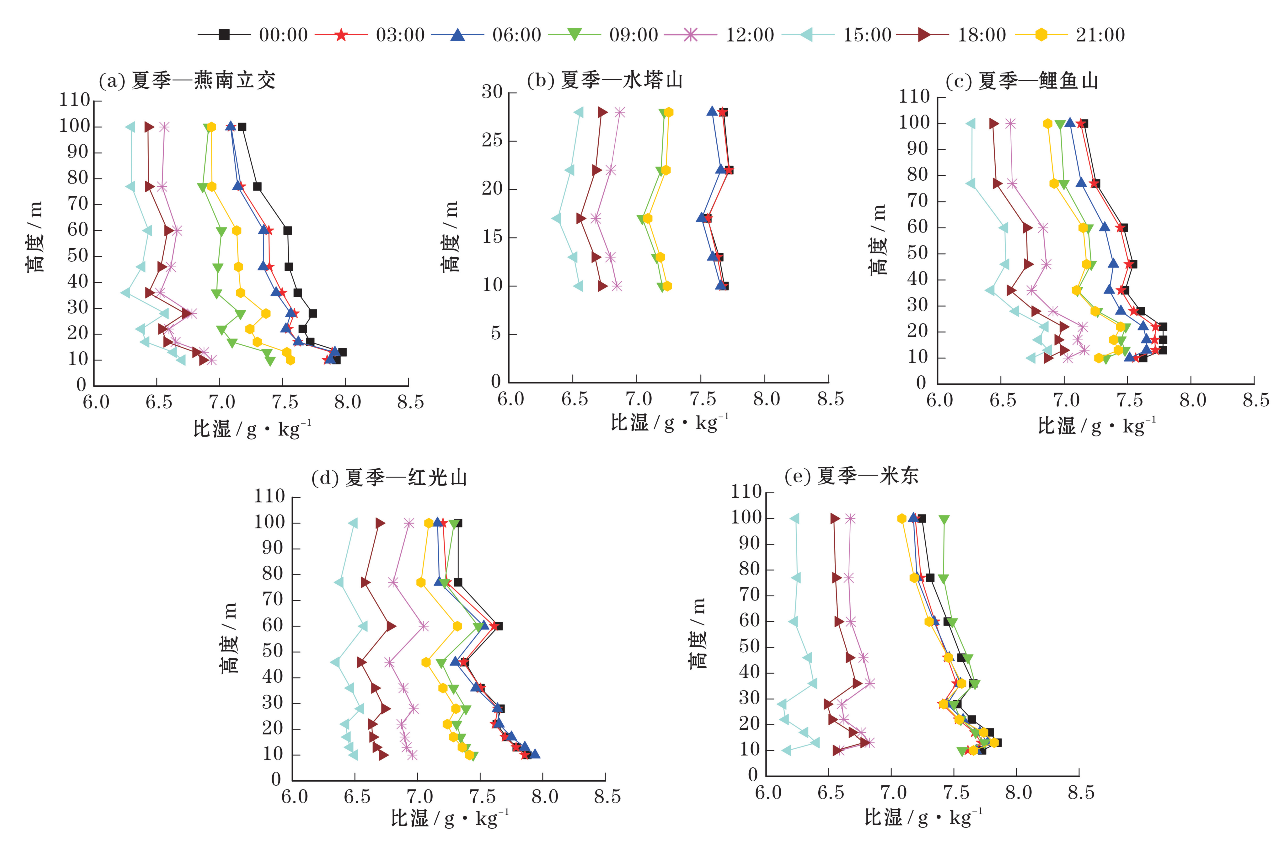


图9　乌鲁木齐市5座梯度塔近地层100 m夏季比湿廓线

Fig. 9　Specific humidity profiles of five 100 m height meteorology towers in summer in Urumqi City

00:00 03:00 06:00 09:00 12:00 15:00 18:00 21:00

(a) 秋季—燕南立交
(b) 秋季—水塔山
(c) 秋季—鲤鱼山
(d) 秋季—红光山
(e) 秋季—米东

高度 / m
比湿 / g · kg⁻¹

图10 乌鲁木齐市5座梯度塔近地层100 m秋季比湿廓线

Fig. 10 Specific humidity profiles of five 100 m height meteorology towers in autumn in Urumqi City

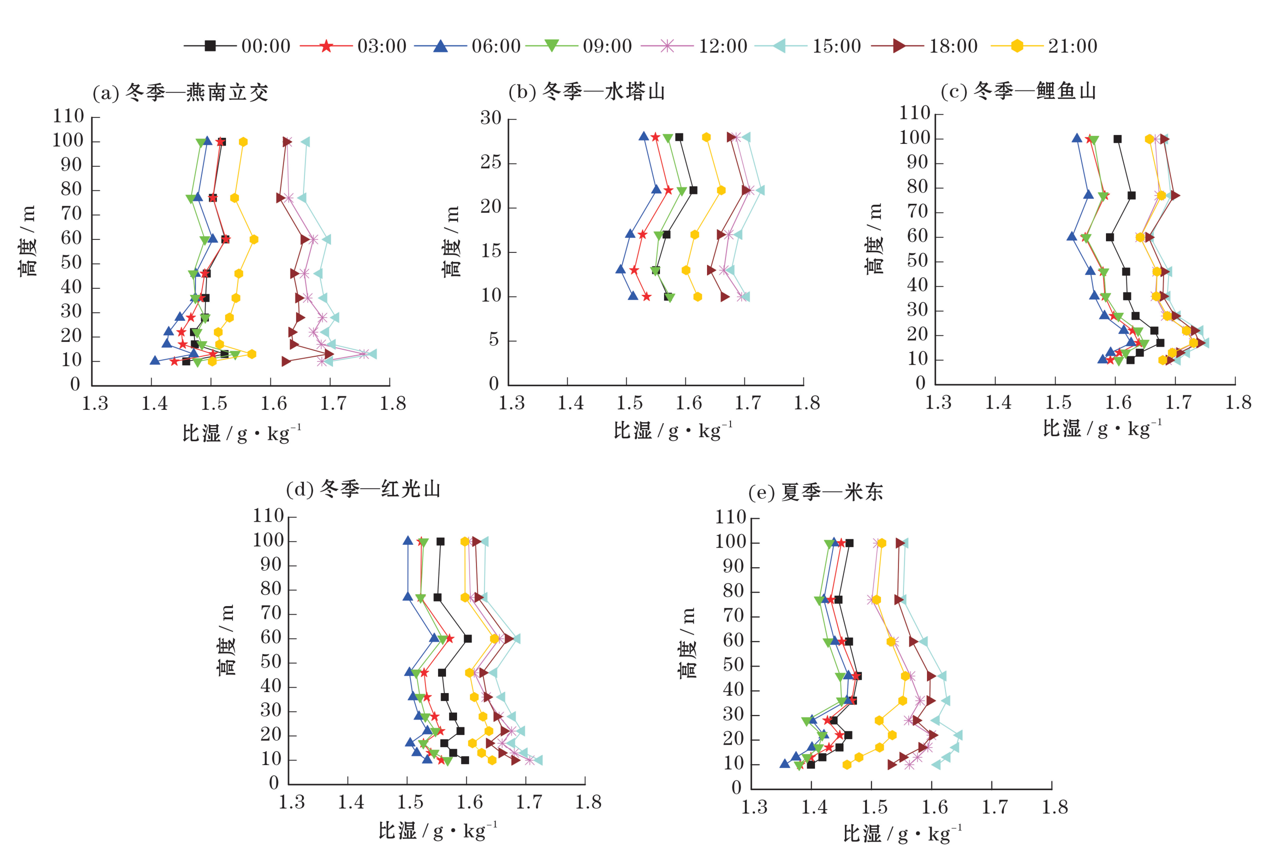


图11 乌鲁木齐市5座梯度塔近地层100 m冬季比湿廓线

Fig. 11 Specific humidity profiles of five 100 m height meteorology towers in winter in Urumqi City

m 高度范围的比湿梯度最大[0.4～0.9 g·kg^{-1}·(100 m)$^{-1}$]。

上述分析表明,乌鲁木齐市比湿垂直分布特征在近地层100 m内与大气边界层2 km内基本一致:夏季空气潮湿比湿大、冬季空气干燥比湿小;夏季比湿随高度增加而减小的特征最明显,春季和秋季次之;冬季比湿在垂直方向上变化很小。

分季节来看,乌鲁木齐市比湿与气温较为一致,都是最大为夏季,其次为秋季和春季,最小是在冬季。100 m范围内比湿在夏季可以达到冬季的4～5倍,秋季和春季相近但秋季略大1 g·kg^{-1}。从日变化来看,夏季和冬季变化幅度最大,且两个季节日变化曲线相位几乎相反。综合来看,夏季夜间比湿大、白天比湿小,冬季则是夜间比湿小、白天比湿大,两个季节正好相反。这主要是由于在夏季时植被茂盛,白天光合作用强、蒸腾强烈,近地层具有较强的局地对流,引起强的空气垂直方向混合,地表水汽上升强烈,近地表气压降低,具有相对较小空气比湿,而大气层结在夜间多稳定结构,近地层的水汽积累比白天多。冬季气温在夜间多维持在冰点以下,因此夜间蒸发微弱,而白天温度又快速上升,蒸发也随之加强,这样就造成冬季与夏季迥然相异。秋、春季日变化介于夏季和冬季之间,主要是由于其为过渡季节。这一特征与极端干旱沙漠区(如塔克拉玛干沙漠腹地)[26]、高寒地区(如青藏高原)[27]、城市下垫面(如北京)[10]是相似的。

从乌鲁木齐市比湿的日分布来看,夏季各气象塔最低比湿出现在15:00,这几乎与夏季最高气温同时出现;南郊和城区最大比湿出现在午夜,北郊米东最大比湿则出现在日出前后。冬季比湿比出现时间比最高气温延迟1～2 h,最低比湿在绝大多数出现于6:00～9:00,而在15:00～18:00出现最大比湿。

乌鲁木齐市不论是城区还是郊区,在全年均有不同程度的逆湿现象,这种逆湿往往与逆温相伴而生,因此可以认为主要是逆温造成的逆湿。南疆沙漠腹地春季近地层20 m高度以上[18]、黑河地区近绿洲的荒漠和戈壁上空[25,28]、青藏高原安多和那曲地区[29-30],还有改则、当雄和昌都[27,31-32]、敦煌荒漠戈壁[33]、四川盆地温江[21]的近地层大气均观测到了不同程度的逆湿。

由于夜间逆温层的存在,造成乌鲁木齐空气稳定,因而地表水汽无法从近地面垂直输送到上层空气中,导致近地层水汽含量不断积累。混合层在日出之后继续发展,但近地层的逆湿仍然存在[图12(2013－07－04 12:00)],这可能与乌鲁木齐城市下垫面特征有关,城区建筑物密集,郊区地形复杂、林草等植被较多有关,同时近地层下层强逆湿出现最频繁,这又是近地层下层蒸发较强的体现。夏季逆湿最强,特别是夏季的最强逆湿出现在北郊米东[达3.1～8.1 g·kg^{-1}·(100 m)$^{-1}$],这与米东位于绿洲与古尔班通古特沙漠的交界处,气象塔的东、西、南三面为农田植被,仅北面为荒漠戈壁,从而存在“绿洲效应”有关。米东附近上空空气较为湿润,米东

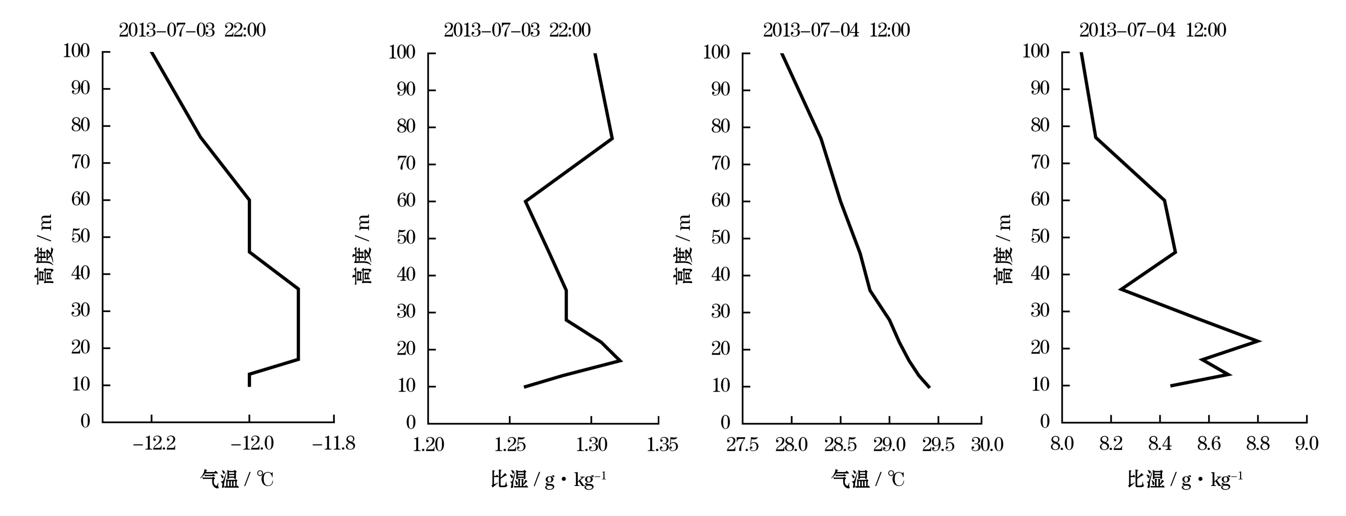


图12 2013年7月3日22:00、4日12:00乌鲁木齐市近地层100 m内气温和比湿廓线

Fig. 12 Air temperature and specific humidity profiles in 0－100 m surface layer on 22:00 July 3, 2013 and 12:00 July 4, 2013 in Urumqi City

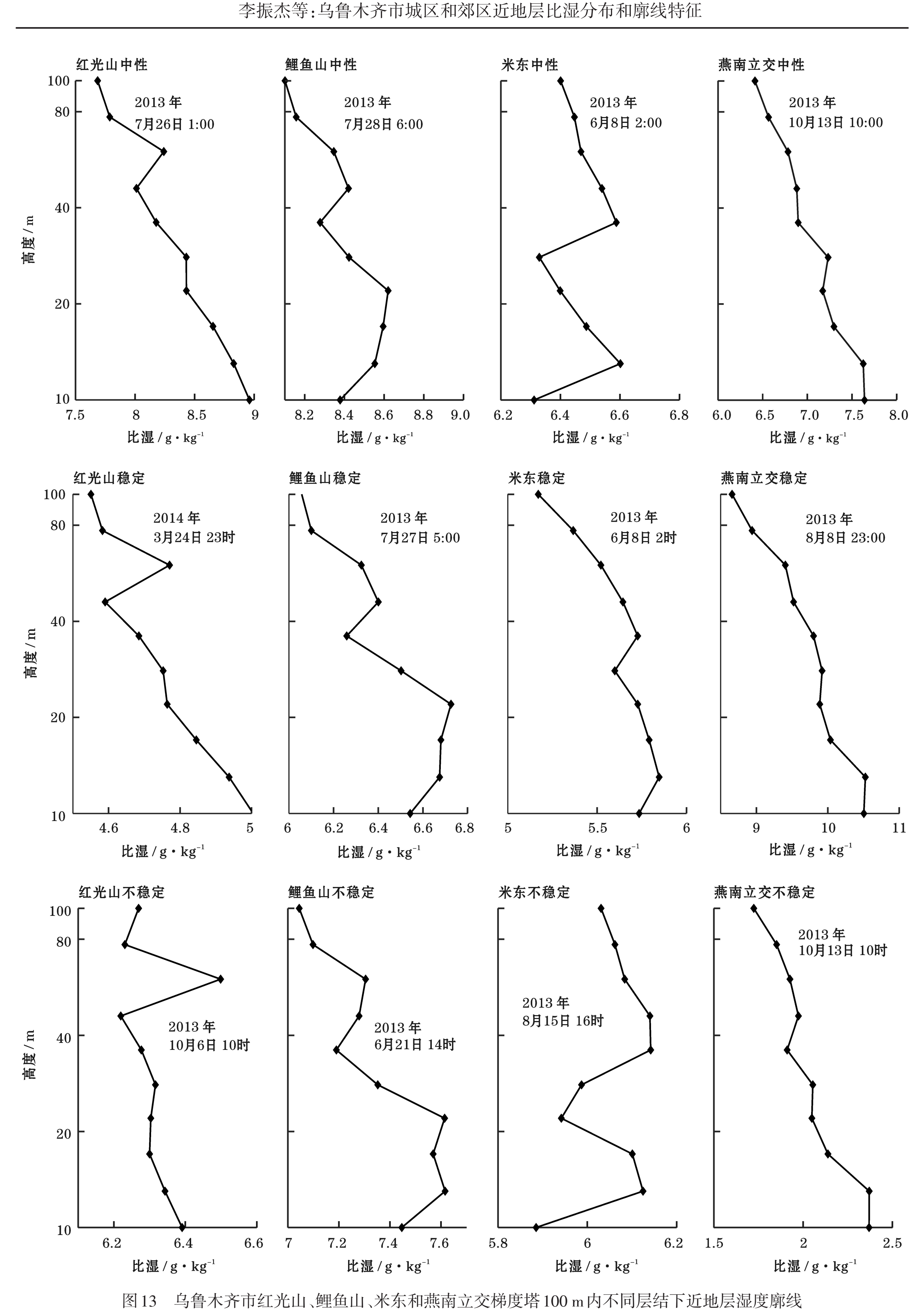


图 13 乌鲁木齐市红光山、鲤鱼山、米东和燕南立交梯度塔 100 m 内不同层结下近地层湿度廓线

Fig. 13 Specific humidity profiles in 0 − 100 m surface layer in HGS, LYS, MD and YNLJ in Urumqi City

夏季近地层100 m内大气主导风向为NNW，从北疆沙漠吹来风是比较干燥的，造成米东近地层下层空气干燥，这样形成了逆湿；逆湿程度在春季和秋季相近，而冬季逆湿是最小的。南郊燕南立交在秋季、冬季、春季逆湿均较强[达0.8～3.2 g·kg^{-1}·(100 m)$^{-1}$]。

3 不同层结下近地层比湿廓线

我们分别挑选了除水塔山外的4座铁塔（由于城区水塔山上5层和下5层资料不是同一年，所以没有对城区水塔山进行分析），并对几个近中性、稳定和不稳定层结下典型时次的数据进行湿度廓线分析。我们对纵坐标高度采用对数坐标，结果如图13所示。其中，近中性层结时城区鲤鱼山和北郊米东湿度廓线偏离对数规律，造成这一现象的原因可能是由于大气稳定度分类结果和所选样本的代表性造成的。很明显的一点，是不同层结条件下近地层湿度廓线均存在多层逆湿现象，只是程度不同。

4 结 论

（1）乌鲁木齐4月、7月、10月、1月边界层2 km内比湿分别约为2～5 g·kg^{-1}、5～9 g·kg^{-1}、2～5 g·kg^{-1}、1～2 g·kg^{-1}。比湿随高度递减，近地层100 m内，春季最大比湿梯度在10～13 m，燕南立交、水塔山、鲤鱼山、红光山、米东最大比湿梯度分别为1.7～3.2、－1.7～－1.3、1～1.3、－1.7～－1.4 g·kg^{-1}·(100 m)$^{-1}$和1.2～1.9 g·kg^{-1}·(100 m)$^{-1}$。夏季最大湿度出现在后半夜，这与春季不同。燕南立交、水塔山、鲤鱼山、红光山、米东夏季最大比湿梯度分别出现在13～17、17～22、10～13、10～13 m和10～13 m，其值分别为－7.2～－5.5、2.1～3.4、4.2～5.2、–2.9～–1.2 g·kg^{-1}·(100 m)$^{-1}$和3.1～8.1 g·kg^{-1}·(100 m)$^{-1}$。秋季最大比湿梯度分别出现在13～17、10～13、22～28、10～13 m和10～13 m，其值分别为－3.9～－3.4、－2.3～－2、－2.1～－1.5、－1.3～–1.2 g·kg^{-1}·(100 m)$^{-1}$和1.9～4 g·kg^{-1}·(100 m)$^{-1}$。冬季最大比湿梯度分别出现在10～13、17～22、13～17、10～13 m和13～17 m，其值分别为2.1～2.5、0.7～0.9、0.8～0.9、－0.9～－0.6 g·kg^{-1}·(100 m)$^{-1}$和0.4～0.9 g·kg^{-1}·(100 m)$^{-1}$。

（2）乌鲁木齐存在逆湿现象，逆湿出现概率超过35%。近地层100 m内，夏季、秋季和冬季比湿廓线存在多层逆湿现象，但冬季逆湿很弱。春季最大逆湿在城区，为1.1～1.2 g·kg^{-1}·(100 m)$^{-1}$；夏季最大逆湿在城区，约4.2～5.2 g·kg^{-1}·(100 m)$^{-1}$，秋季最大逆湿在南郊，为0.8～3.2 g·kg^{-1}·(100 m)$^{-1}$。

（3）乌鲁木齐市城区和郊区比湿季节变化和日变化特征明显。红光山、鲤鱼山、水塔山、米东、燕南立交100 m内平均比湿分别为3.87～4.1、3.8～4.11、3.93～4.01、3.82～4.06 g·kg^{-1}和3.75～4.05 g·kg^{-1}。1或2月比湿最小、7月或8月比湿最大。城区和郊区夏季最低比湿几乎出现在16:20～18:00，最高比湿出现时间不固定，红光山和米东在8:30～10:10，鲤鱼山、水塔山和燕南立交在0:50～3:20；冬季最低比湿绝大多数出现在8:40～10:00，最高比湿出现时间在15:20～17:50，比冬季最高气温延迟1～2 h。夏季和秋季比湿夜间大、白天小，冬季比湿夜间小、白天大，春季比湿日变化不明显。

参考文献(References)

[1] 刘国纬. 水文循环的大气过程[M]. 北京：科学出版社，1977. [LIU Guowei. Atmospheric process of hydrological cycle[M]. Beijing：Science Press，1977.]

[2] 王宝鉴，黄玉霞，陶健红，等. 西北地区大气水汽的区域分布特征及其变化[J]. 冰川冻土，2006，28(1)：15－21. [WANG Baojian，HUANG Yuxia，TAO Jianhong，et al. Regional features and variations of water vapor in northwest China[J]. Journal of Glaclology and Geocryology，2006，28(1)：15－21.]

[3] 郭艳君，丁一汇. 1958—2005年中国高空大气比湿变化[J]. 大气科学，2014，38(1)：1－12. [GUO Yanjun，DING Yihui. Upper-air specific humidity change over China during 1958－2005[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences，2014，38(1)：1－12.]

[4] SOLOMON S，QIN D，MANNING M，et al. Climate change 2007 the physical science basis[M]. New York：Cambridge University Press，2007.

[5] DAI A G，WANG J H，THOME P W，et al. A new approach to homogenize daily radiosonde humidity data[J]. J. Climate，2011，24：965－991.

[6] MCCARTHY M P，THOME P W，TITCHMER H A. An analysis of tropospheric humidity trends from radiosondes[J]. J. Climate，2009，22(22)：5820－5838.

[7] PALTRIDGE G，ARKING A，POOK M. Trends in middle-and upper-level tropospheric humidity from NCEP reanalysis data[J]. Theor Appl Climatol，2009，98：351－359.

[8] ZHAO T B，DAI A G，WANG J H. Trends in tropospheric humidity from 1970 to 2008 over China from a homogenized radiosonde dataset[J]. J. Climate，2012，25(13)：4549－4567.

[9] 许宝荣，邹松兵，杜得彦，等. 1981—2010年黑河流域中下游对流层大气比湿变化[J]. 冰川冻土，2016，38(1)：57－68.[XU Baorong, ZOU Songbing, DU Deyan, et al. Variation of tropospheric specific humidity upon the middle-lower reaches of the Heihe River during 1981－2010[J]. Journal of Glaciology and Geocryology，2016，38(1)：57－68.]

[10] 窦晶晶，王迎春，苗世光. 北京城区近地面比湿和风场时空分布特征[J]. 应用气象学报，2014，25(5)：559－569.[DOU Jingjing, WANG Yingchun, MIAO Shiguang. Fine spatial and temporal characteristics of humidity and wind in Beijing urban area[J]. Journal of Applied Meteorological Science，2014，25(5)：559－569.]

[11] HAGE K D. Urban-rural humidity differences[J]. J Appl Meteor，1975，14：1277－1283.

[12] 姚俊强，杨青，韩雪云，等. 乌鲁木齐夏季水汽日变化及其与降水的关系[J]. 干旱区研究，2013，30(1)：67－73.[YAO Junqiang, YANG Qing, HAN Xueyun, et al. Analysis on daily variation of water vapor and its relationship with rainfall in Urumqi in summer[J]. Arid Zone Research，2013，30(1)：67－73.]

[13] 金莉莉，何清，李振杰，等. 乌鲁木齐市气象塔梯度观测资料质量控制与处理[J]. 气象，2016，42(6)：732－742.[JIN Lili, HE Qing, LI Zhenjie, et al. Quality control method and treatment for Urumqi meteorology tower gradient observation data[J]. Meteorological Monthly，2016，42(6)：732－742.]

[14] 周明煜，钱粉兰，陈陟，等. 西藏高原斜压对流边界层风、温、湿廓线特征[J]. 地球物理学报，2002，45(6)：773－783.[ZHOU Mingyu, QIAN Fenlan, CHEN Zhi, et al. The characteristics of the profiles for wind, temperature and humidity in the baroclinic convective boundary layer on Xizang Plateau[J]. Chinese Journal of Geophysics，2002，45(6)：773－783.]

[15] STULL R B. An introduction to boundary layer meteorology[M]. 杨长新译. Amsterdam：Kluwer Academic Publishers，1988.

[16] 王俊勤，胡隐樵，陈家宜，等. HEIFE区边界层某些结构特征[J]. 高原气象，1994，13(3)：299－306.[WANG Junqin, HU Yinqiao, CHEN Jiayi, et al. Some characteristics of structure of planetary boundary layer over HEIFE area[J]. Plateau Meteorology，1994，13(3)：299－306.]

[17] 陈陟，吴志明. TOGA-COARE IOP期间的海气通量观测结果[J]. 地球物理学报，1997，40(6)：753－762.[CHEN Zhi, WU Zhiming. Results of air-sea flux observation during TOGA-COARE IOP[J]. Acta Geophysic Sinica，1997，40(6)：753－762.]

[18] 李祥余. 塔克拉玛干沙漠腹地近地层微气象学特征研究[D]. 乌鲁木齐：新疆大学，2007.[LI Xiangyu. Surface-layer micrometerological characteristics in hinterland of Taklimakan Desert[D]. Urumqi：Xinjiang University，2007.]

[19] 胡隐樵. 黑河实验(HEIFE)能量平衡和水汽输送研究进展[J]. 地球科学进展，1994，9(4)：30－34.[HU Yinqiao. Research advance about the energy budget and transportation of water vapour in the HEIFE area[J]. Advance in Earth Sciences，1994，9(4)：30－34.]

[20] 罗布，卓嘎，杨秀海. 西藏改则地区在东亚季风前期大气层特征[J]. 高原山地气象研究，2009，29(1)：1－5.[LUO Bu, ZHUO Ga, YANG Xiuhai. The atmospheric characteristics in the early period of east Asian monsoon in Gaize, Tibet[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research，2009，29(1)：1－5.]

[21] 蒋兴文，李跃清，王鑫，等. 青藏高原东部冬季边界层的基本特征及其对下游大气的影响[C]//2009年高原山地气象研究暨西南区域气象学术交流会，2009：625－633.[JIANG Xingwen, LI Yueqing, WANG Xin, et al. The basic characteristics of the winter boundary layer in the eastern Tibetan Plateau and its influence on the lower atmosphere[C]//2009 plateau mountain meteorological research and meteorological academic exchange conference in southwest China，2009：625－633.]

[22] 卞林根，程彦杰，王欣，等. 北京大气边界层中风和温度廓线的观测研究[J]. 应用气象学报，2002，13(特刊)：13－25.[BIAN Lingen, CHENG Yanjie, WANG Xin, et al. Observational study of wind and temperature profiles of urban boundary layer in Beijing winter[J]. Journal of Applied Meteorological Science，2002，13(Suppl.)：13－25.]

[23] 阎宇平，王介民，苏中波. 黑河实验区沙漠戈壁上空"逆湿"的数值模拟[J]. 气象学报，2001，21(1)：36－43.[YAN Yuping, WANG Jiemin, SU Zhongbo. Numerical simulation of "Inverse humidity" over desert / gobi in HEIFE area[J]. Scientia Meteorologica Sinica，2001，21(1)：36－43.]

[24] 胡隐樵，王俊勤，左洪超. 临近绿洲的沙漠上空近地面层内水汽输送特征[J]. 高原气象，1993，12(2)：125－132.[HU Yinqiao, WANG Junqin, ZUO Hongchao. Character of water vapour transportation in the surface layer over desert near oasis[J]. Plateau Meteorology，1993，12(2)：125－132.]

[25] 胡隐樵，奇跃进，杨选利. 河西戈壁(化音)小气候和热量平衡特征的初步分析[J]. 高原气象，1990，9(2)：113－119.[HU Yinqiao, QI Yuejin, YANG Xuanli. Preliminary analyses about characteristics of microclimate and heat energy budget in Hexi gobi(Huayin)[J]. Plateau Meteorology，1990，9(2)：113－119.]

[26] 金莉莉，曹兴，李振杰. 塔中比湿变化特征[J]. 沙漠与绿洲气象，2012，6(2)：53－57.[JIN Lili, CAO Xing, LI Zhenjie. Variation characteristics of specific humidity in Tazhong[J]. Desert and Oasis Meteorology，2012，6(2)：53－57.]

[27] 彭艳，张宏升，刘辉志，等. 青藏高原近地面层气象要素变化特征[J]. 北京大学学报(自然科学版)，2005，41(2)：180－190.[PENG Yan, ZHANG Hongsheng, LIU Huizhi, et al. Characteristics of micro-meteorology in the surface layer over Tibetan Plateau area[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinenisis，2005，41(2)：180－190.]

[28] 王介民，刘晓虎，祁永强. 应用涡旋相关法对戈壁地区湍流输送的初步研究[J]. 高原气象，1990，9(2)：120－129.[WANG Jiemin, LIU Xiaohu, QI Yongqiang. A preliminary study of turbulence transfer characteristics in gobi area with an eddy correlation technique[J]. Plateau Meteorology，1990，9(2)：120－129.]

[29] 谷良雷，胡泽勇，吕世华，等. 藏北高原夏季典型天气大气边界层特征分析[J]. 冰川冻土，2006，28(6)：893－899.[GU Lianglei, HU Zeyong, LV Shihua, et al. Atmosphere boundary layers in typical days over the north Tibet Plateau during summer[J].

Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(6): 893 - 899.]

[30] ZUO H C, HU Y Q, LI D L, et al. Seasonal transition and its boundary layer characteristics in Anduo area of Tibetan Plateau [J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(3): 239 - 245.

[31] 李家伦,洪钟祥,孙淑芬. 青藏高原西部改则地区大气边界层特征[J]. 大气科学,2000,24(3):301 - 312.[LI Jialun, HONG Zhongxiang, SUN Shufen. An observational experiment on the atmospheric boundary layer in Gerze area of the Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2000, 24(3): 301 - 312.]

[32] XU X D, ZHOU M Y, CHEN J Y, et al. A comprehensive physical pattern of land-air dynamic and thermal structure on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Science in China (Series D: Earth-Sciences), 2002, 45(7): 577 - 594.

[33] 张强,卫国安,侯平. 初夏敦煌荒漠戈壁大气边界层结构特征的一次观测研究[J]. 高原气象,2004,23(5):587 - 597. [ZHANG Qiang, WEI Guoan, HOU Ping. Observation studies of atmosphere boundary layer characteristic over Dunhuang gobi in early summer[J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(5): 587 - 597.]

Characteristics of specific humidity distribution and profiles in Urumqi City and suburbs

LI Zhen-jie[1,2,3], JIN Li-li[4,5], HE Qing[4,5], MIAO Qi-long[5], ALI Mamtimin[4]

(1 *Lincang Meteorological Bureau*, *Lincang* 677099, *Yunnan*, *China*;

2 *Xinjiang Institute of Ecology and Geography*, *Chinese Academy of Sciences*, *Urumqi* 830011, *Xinjiang*, *China*;

3 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*;

4 *Taklimakan Desert Meteorology Field Experiment station of CMA*, *Institute of Desert Meteorology*, *China Meteorological Administration*, *Urumqi* 830002, *Xinjiang*, *China*;

5 *College of Applied Meteorology*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044, *Jiangsu*, *China*)

Abstract: Observations from L-Band radar and 10-layer data collected at five 100-m-high meteorological towers in Urumqi City, Xinjiang, northwestern China were used to analyze the characteristics of the specific-humidity profile within 2 km, including seasonal and diurnal variation in urban and suburban Urumqi. The results, which reveal moisture inversion, were as follows: (1) The levels of specific humidity vary by season (summer > autumn > spring > winter). In summer, specific humidity is about 4–5 times that of winter, and that of autumn is ~1 g·kg^{-1} more than in spring. In spring, summer, and autumn, the specific humidity was less at greater heights, especially in summer, whereas the change with height was less in winter. Multiple minimum values appeared on the specific humidity profile, and the appearance height is basically the same. The daily variation of specific humidity was the most in summer and winter but opposite in phase during these seasons. The specific humidity is high (low) at night, low (high) during the day in summer (winter). Specific humidity is less in the suburbs than in urban areas in winter, but it is the urban–suburban difference is less obvious in the other seasons. (2) Moisture inversion is evident within 2 km. Its probability is > 35%. January shows the maximum probability, and July, the minimum. In January, the maximum height of moisture inversion is > 1 500 m, but in July it can reach 1 900 m, with a maximum thickness of < 1 550 m. The maximum moisture inversion was 2.5 g·kg^{-1} per 100 m in July and October, and the minimum was in January. (3) Moisture inversion often was accompanied by temperature inversion in January in Urumqi. The vertical distribution of water vapor changed according to the temperature-inversion layers. The moisture inversion, which is also related to water-vapor transport, usually appeared from the top of the temperature-inversion layer. This study can effectively reveal seasonal characteristics of air humidity and provide a basis for studying meteorological factors affecting air pollution in cities.

Key words: boundary layer; specific humidity; profile; Urumqi City